中華農業氣象 (Chinese J. Agromet.) 8 : 77 - 92, 2001

研究報告(Original Paper)

水稻不同期作植被反射光譜之動態分析[1]

陳榮坤[2] 楊純明[3,6] 張芳銘[4] 蘇慕容[5]

行政院農委會農業試驗所農藝組

摘 要

本項研究針對近地面偵測之田間水稻於一、二期稻作全生育期間之植被高解析光譜進行分析，期以瞭解期作間植被光譜之動態變化，並探討光譜曲線之特徵與特性，作為未來應用於栽培管理等多元用途。根據本研究結果，水稻植被反射光譜與多數的綠色植被光譜相似，紫外光波段 (uv) 及可見光波段 (vis) 之反射比較低，分別小於 8 及 16%，近紅外光 (nir)、短波紅外光 (swir) 及中紅外光 (mwir) 等波段之反射比較高，分別大於 14、7 及 4%，各波段均隨生育進展而異。又在可見光波段中，綠光之 550 nm 附近的反射比值較高，紫光之 400-413 nm 及紅光之 670 nm 部位則較低。而近紅外光波段反射比介於 14-55% 之間，短波紅外光波段介於 7-31%，中紅外光波段介於 4-24% 之間，高低差距甚大。一、二期稻作的反射光譜曲線類似，惟各波段的反射比變化存有差異，顯示各期作之不同環境為影響原因之一。各生育期之光譜曲線變異亦不一致，反映出各生育階段之植被色澤、形態及結構上的差異。由綠光、紅光及近紅外光等波段之光譜特徵，發現其在全生育期間呈現曲線變化，前二項為凹形曲線，後者為凸形曲線。在所觀察的六項指數中，RED/NIR、RED/GREEN 及 GREEN/NIR 等比值均為凹形二次曲線，NDVI 及 RES 則為凸形二次曲線演變，唯 REIP 隨著生育進展而上升，故紅光臨界轉折點 (REIP) 之位移可供釐訂區分水稻不同生育階段之參考。

關鍵詞：水稻、期作、植被反射光譜、反射比、光譜特徵、動態分析。

Dynamic Variation of Reflectance Spectra of Rice Canopy in Different Cropping Seasons

Rong-Kuen Chen, Chwen-Ming Yang, Fan-Min Chang and Muh-Rong Su (Department of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute)

ABSTRACT : Canopy reflectance spectra of hyperspectral resolution from rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000 were analyzed to study the dynamic variations of spectral curves and the spectral characteristics. As the results indicated that canopy reflectance spectrum was similar to those from other green plants. The reflectance was lower in the ultraviolet (< 8%) and visible (< 16%) wavebands and higher in the near infrared (> 14%), short-wave infrared (> 7%), and middle-wave infrared (> 4%) regions, and varied during the growth. In the visible light, the maximum reflectance was located near 550 nm of

---

1. 本文研究承蒙行政院農業委員會 (89遙測-4.1-糧-41(4)) 及農委會農業試驗所 (90農科-4.1.1-農-C2(01))之計畫經費支持，特以致謝；田區管理獲農試所農場組協助謹致誠摯感謝。

2. 行政院農委會農業試驗所農藝組助理，3. 副研究員，4. 助理研究員，5. 及前助理。

6. 通信作者，E-mail:cmyang@wufeng.tari.gov.tw，電話：04-2330-2301分機 135。

green light and the minimum reflectance was closed to 400-413 nm of violet and 670 nm of red light. During the cropping seasons, reflectance of near infrared changed from 14 to 55 %, short-wave infrared changed from 7 to 31%, and middle-wave infrared changed from 4 to 24%. Although the pattern of reflectance spectrum was similar between cropping seasons, differences existed in different wavebands, both in wavelengths and reflectance, due to the contrast climatic environment during the growing periods. The variations in spectral curves between growth stages and cropping seasons were the combination effects of differences in coloration, morphology and architecture of canopy. Seasonal changes in reflectance at green light maximum, red light minimum, and near infrared peak were curvilinear. The spectral indices resulted from these spectral characteristics followed the changes of these parameters along plants development. Among them, the red edge inflection point has the potential as an index for classifying developmental stages of rice plants.

Key words : Rice, Cropping season, Canopy reflected spectrum, Reflectance, Spectral characteristics, Dynamic analysis.

前 言

所謂遙測，係指以感測儀器或設備(施)非接觸式的觀測或量測被測物的狀態或景況。吾人可利用遙測技術針對地面植被進行特定目的(標)的偵(監)測，來探索與探討植被種類、作物相分佈、覆蓋比例、生長狀況及周遭環境等，據以進行各種評估和作業規畫。遙測在農業上具有廣泛的應用潛力與價值，例如監測農作物的生長狀態，以瞭解植株生育進展(楊及蘇，1997)、植體的光合作用活動力(Christensen, 1991)、病蟲害的發生與危害(Fleischer et al., 1997)、雜草的蔓延與分佈(Johnson et al., 1997)、灌溉的流程與控制(Brusch, 1989)、甚至於產量的估測與預測(Yang et al., 1998)等。另外，也可以依照監測所獲得農田的變異分佈，適地適時適量適法的從事農作物與土壤的經營與管理，達到精準農業(耕)的層次(楊，2000; Plant et al., 1999)而穩定農作物的生產與品質。

光譜遙測為遙測技術之一種，主要藉著被測物反射光譜之光譜特徵，來辨識與判讀被測物當時所處的狀態(楊，1997)。惟光譜遙測在進入應用階段之前，必須收集充分的光譜資料，瞭解不同光譜特徵與各種性狀(物理或化學)之間的關聯性，進而建立光譜特徵參數模式以對農田進行監測用途。一般言，光譜遙測主要涵蓋350-2500 nm間(或350-3000 nm)的波長範圍，可依此波段之波長與其反射比之關係描繪出反射光譜曲線(Fuchs, 1990)。在農作物葉片之光譜曲線中，紫外光(＜400 nm)多穿透植體，反射比(率)低；可見光(400-740 nm)之反射比大部分決定於光合色素的多寡，光合色素濃度愈低，反射比愈高；近紅外光(740-1300 nm)受葉內構造的影響較大，葉內細胞壁、細胞間隙及充填其內的水分均造成反射現象，而呈現高反射比；1300-2500 nm間的短、中紅外光則多被植體水分吸收，而呈現低反射比(Puritch, 1981)。由於作物植體內所含物質及組織構造依不同作物或品種而異，亦因不等年齡或所處環境產生變異，其全波段反射光譜曲線往往有不同的表現，吾人可依光譜變化及光譜特徵差異作為辨別的依據(楊，1999; Jacobsen et al., 1995)。

為使農作物光譜分析技術應用到田間栽培管理工作，許多學者專家開始將作物植被的光譜特徵進行比較與分析，用以建立判識作物性狀之植被光譜指標或光譜特徵參數模式。早期 Jordan (1969) 以 simple

ratio (SR)、Rouse et al. (1973) 以 normalized difference vegetation index (NDVI) 作爲估測地表植被覆蓋率的光譜指標，1987 年 Wanjura and Hatfield 針對棉花 (*Gossypium hirsutum* L.)、大豆 (*Glycine max* L.)、向日葵 (*Helianthus annus* L.) 及高粱 (*Sorghum bicolor* L.) 等四種作物進行光譜特徵的研究，發現 NDVI 與綠度 (greenness) 的比值對作物營養生長期的生質量 (biomass) 有良好的預測效果，而紅光 (RED，red light) 與近紅外光 (NIR，near infrared) 的比值 (RED/NIR ratio) 則與成熟期的生質量具有高度相關。Shibayama et al. (1993) 進行水稻植被光譜分析時，發現 NIR 與中紅外光 (MIR，mid-infrared) 波段反射比曲線的一次微分可提供水稻植體水分缺乏的早期偵測。Chen (1996) 也指出，可利用 MSR (modified simple ratio) 及 G (greenness index) 作爲植體遭受逆境時的指標。Yang and Cheng (2001) 在遭受褐飛蝨感染的水稻植被光譜上，發現 737-925 nm 波段反射比可反映出受害等級之差異。

水稻是臺灣地區栽培面積最大、產值最高的糧食作物，若能利用光譜遙測技術配合於監測與栽培管理，將可節省許多非必要人力物力，助益於減少環境污染、降低生產成本及維持穩定的產量與品質。而應用前首要之務，乃在於建立水稻正常生育過程及逆境條件下的地面遙測光譜資料庫。水稻全生育期的生長過程中，從發芽、移植、分蘗、抽穗開花、穀粒充實到完熟收穫，其植被的覆蓋、葉色的變化及植體與植被的結構均不相同，因此可預見其植被光譜將隨著生育期及環境狀況而異。從植物生理的角度進一步言之，由於生命循環，生理代謝必將隨著生長而異動，並將引起植體構造、形態及顏色變化表現於外，於是勢將造成植被的反射光譜及光譜特徵伴隨生育進展而有所不同。楊及蘇 (1997) 指出，一、二期稻作全生育期間水稻植被光譜曲線隨生育進展而異，且水稻兩期作植冠 (被) 反射光譜在紫外光及可見光波段 (350-700 nm) 範圍內，除生育初期及成熟期外，其餘時期反射率皆小於 15%，近紅外光波段 (740-1100 nm) 反射率於全生育期間維持在 30-55% 範圍之間。若欲深入分析植體生理生化與結構上的關聯互動，則必須觀察紫外光、可見光及近紅外光等波段在全生育期的細微變化。

本研究主要在測定與蒐集水稻族群在正常生育過程下的植被反射光譜，精細的觀察與分析從紫外光直至中紅外光等不同波段全生育期的改變，比較反射比的高低落差，並探討各波段與數種植被指數的動態分佈，以充分瞭解生育期間及一、二期稻作之間光譜變化的差異性。

材料與方法

本研究之田間試驗在行政院農業委員會農業試驗所農場進行，共二十塊田區，每一田區面積約 0.5 公頃，作爲提供近地面遙測一、二期稻作植冠 (被) 反射光譜的族群植被。參試水稻 (*Oryza sativa*) 品種爲臺農 67 號。2000 年第一期稻作在 2 月 14-18 日機插，6 月 16 日收穫，生育日數約 122 天。第二期稻作於 8 月 1-5 日機插，12 月 6 日收穫，生育日數約 125 天 (本期作收穫較遲，約在完熟後 7-14 天收割)。試驗期間栽培方法採用慣行法，以南北向機械插秧，每叢 3-5 株，行株距約爲 0.30 m×0.18 m。於插秧前 5 天施用臺肥 39 號 (臺灣肥料公司，高雄市) 300 kg ha^{-1} 爲基肥，第一次追肥分別約於 2 週 (一期作) 及 1 週 (二期作) 後施用臺肥 1 號 100 kg ha^{-1}，第二次追肥分別約於 4 週 (一期作) 及 3 週 (二期作) 後施用臺肥 1 號 200 kg ha^{-1}，約 9 週 (一期作) 及 6 週 (二期作) 後施用硫酸銨 160 kg ha^{-1} 爲穗肥。農藥施用視病蟲草害發生狀況而定，以 6%

培丹粒劑 30 kg ha^{-1} 防治二化螟蟲及瘤野螟，以 40% 加保扶水懸劑 1.2 L ha^{-1} 及 50% 維利黴素 1 L ha^{-1} 等千倍稀釋液防治紋枯病及其他蟲害。除草劑係以 5% 丁基拉草粒劑 30 kg ha^{-1} 於插秧一週內施用防除禾本科雜草，分蘗初期以 44.1% 本達隆溶液 3 L ha^{-1} 劑量 200 倍稀釋液防除鴨舌草及螢藺等雜草。

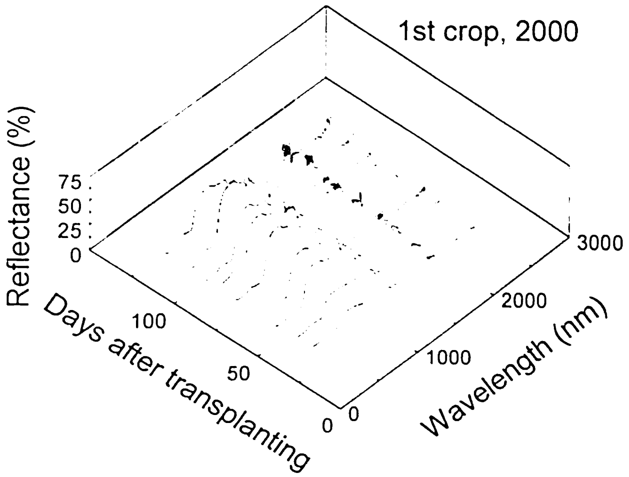
植被 (冠) 反射光譜以攜帶式輻射光譜分析儀 (spectroradiometer，model GER-2600， Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, U.S.A.) 進行光輻射 (radiance) 測定，量測波長範圍 350-2500 nm， 其中 350-1050 nm 波距 (bandwidth) 1.5 nm，1050-2500 nm 波距11.5 nm。光輻射掃描器具有 10 度視角(FOV)，固定於距離植被約 5.8 m 之高空作業車上垂直偵測反射光譜。每一塊田區量測 15 定點，每一定點預設為 4 次掃描之平均值，取 15 定點均值為該區代表值。反射比係由目標植被區之光輻射除以同波長之標準白板 ('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, USA) 反射光輻射 (即參考值) 來計算。水稻族群植被反射光譜係自插秧起每隔 1-2 週測量一次，於上午十時至下午二時之間選擇晴朗無雲時段偵測，以減少太陽入射角及遮雲的干擾。由於稻株生育初期的植被尚未完全覆蓋地表，植被反射光譜將受到土壤及灌溉水影響，因此本研究資料僅使用未受水分及土表干擾的光譜曲線。

將反射光譜範圍區分為紫外光 (350-400 nm)、紫光 (400-425 nm)、藍光 (425-490 nm)、綠光 (490-560 nm)、黃光 (560-585 nm)、橘光 (585-640 nm)、紅光 (640-740 nm)、近紅外光 (740-1300 nm)、短波紅外光 (1300-1800 nm) 及中紅外光 (1800-2500 nm) 等 10 波段 (wavebands)，以瞭解光譜內各波段在全生育期間之變化。又比較分蘗期、最高分蘗期、抽穗期及收穫前之光譜曲線變異，以釐清不同生育階段之植被色澤、形態及結構對反射光譜之影響。此外，由光譜曲線之波形，篩檢綠光波段峰點 (GREEN)、紅光波段谷點 (RED) 及近紅外光頂點 (NIR) 為曲線特徵波長，並由其反射比之個別比例關係探討 RED/NIR、RED/GREEN、 GREEN/NIR 及 (NIR-RED)/(NIR+RED) 等指數在生育期間之改變，其中 (NIR-RED)/(NIR+RED) 被稱為標準差植被指數 (NDVI， normalized difference vegetation index)。同時亦計算紅光臨界 (red edge) 之轉折點 (REIP，red edge inflection point) 及紅光臨界斜率 (RES，red edge slope)，以究明其在生育進展之表現，其中 REIP 為紅光波段至近紅外光波段間一次微分最小值波長，RES 為 (NIR-RED)/(λ_{NIR}-λ_{RED})，而 NIR 及 RED 為反射比，λ_{NIR} 及 λ_{RED} 則為波長位置。

結果與討論

一、二期稻作植被反射光譜曲線之動態變化

眾所周知，農作物植株之色澤、形態及結構隨著生育之進展而異，亦受到周遭土壤條件、氣象環境及人為栽培管理差異的影響。此一結果勢將改變族群植被之吸收、反射及穿透等光學特性，並綜合反應在植被反射光譜上的多樣變化。圖 1 乃 2000 年一、二期稻作生育期間定期偵測之水稻族群植被反射光譜之三維動態變化 (three-dimensional dynamic variations)，由參試二十塊田區計算出之反射光譜平均值曲線之時間序列顯示，水稻族群植被光譜係動態的。光譜曲線不僅因時而異，其不同波長反射比也隨著波段而改變。經進一步分析於圖 2，發現在所切割之紫外光 (uv)、可見光 (vis)、近紅外光 (nir)、短波紅外光 (swir) 及中紅外光 (mwir) 等波段，紫



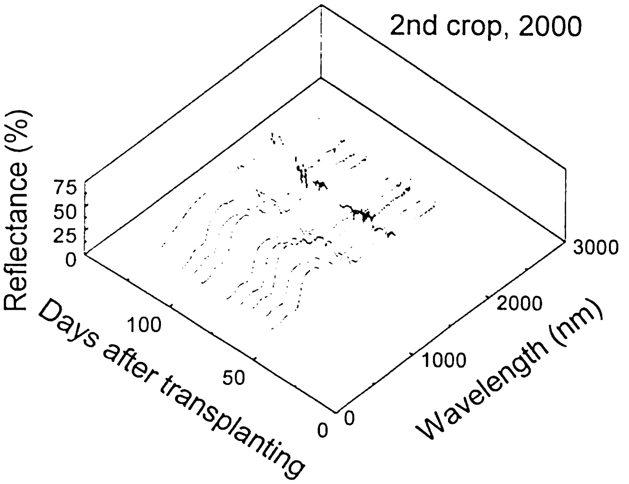


Fig. 1. Three-dimensional dynamic variations of canopy reflectance spectra from rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000.

外光及可見光波段之反射比較低，全生育期間分別小於 8 及 16%，其它三波段較高，分別大於 14、7 及 4%。其中，近紅外光波段反射比介於 14-55% 之間，短波紅外光波段介於 7-31%，中紅外光波段則介於 4-24% 之間，高低差距甚大；而紫外光波段介於 2-8%，可見光波段介於 3-16%，生育期間反射比差距較小。再繼續詳細分析可見光波段於圖 3，大致上以紅光之反射比最高，藍光之反射比最低。依照變異範圍大小排序，分別爲紅光 (7-23%)、橘光 (2-19%)、綠光 (3-17%)、紫光 (2-14%)、黃光 (2-11%) 及藍光 (1-10%)。由圖 1 至圖 3 結果顯示，水稻植被反射光譜曲線確實隨著株齡之增加產生相當之變化，包括光輻射之品質及強度均有顯著差異。此外，以上結果亦顯示，雖然兩期作之植被光譜類似，其質量之間仍有明顯分別，充分反映一、二期稻作之不同環境爲影響原因之一。

經篩檢分蘗期 (tillering stage)、最高分蘗期 (maximum tillering)、抽穗期 (heading) 及收穫 (harvest) 前等四個生育時期之植被光譜代表分析，如圖 4 和表 1A 及表 1B，可以清楚瞭解不同生育階段光譜曲線之變化及變異大小。這些光譜上的差異，忠實呈現當時植被之生長狀態，以及參試二十塊

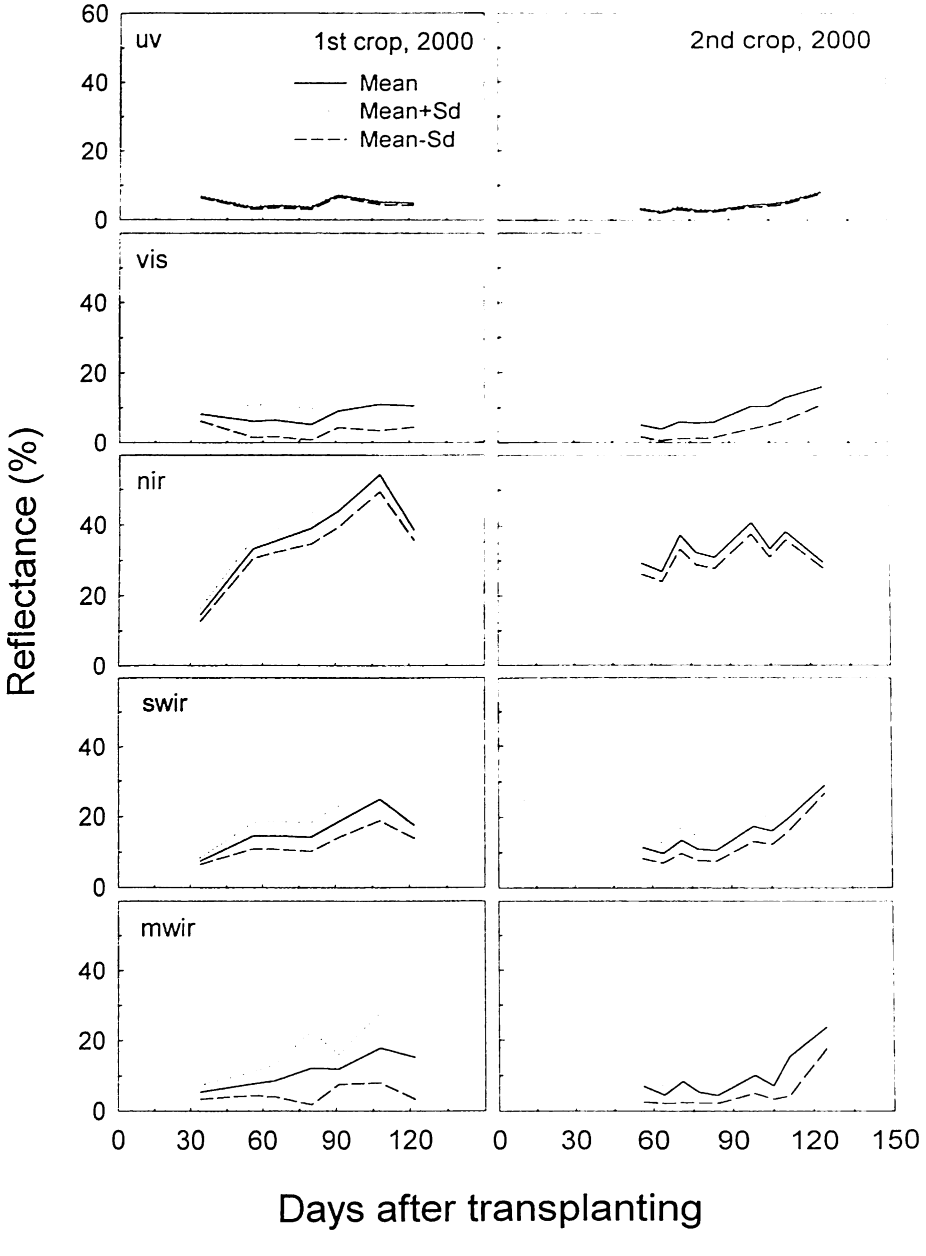


Fig. 2. Seasonal variations of reflectance in different wavebands of canopy reflectance spectra from rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000.

田區之植被變異情形。由表 1A 及表 1B 資料，紫外光 (uv) 波段之最高吸收峰位於 400 nm 附近，可見光(vis)最大吸收帶位於紫光 400-413 nm 及紅光 670 nm 附近，近紅外光 (nir) 最大吸收波長為 1193 nm。近紅外光之最大反射比於一、二期作分別落於 806-890 及 872-1161 nm 區間，短波紅外光 (swir) 之最大反射比位於 1316 nm，而中紅外光 (mwir) 之最大反射比在一、二期作分別為 1850 及 1837 nm。值得注意的是，各波段在不同生育階段之變異不一，且概以中紅外光波段 (1800-2500 nm) 內之反射比有較大變異。顯然的，此結果顯示中紅外光波段

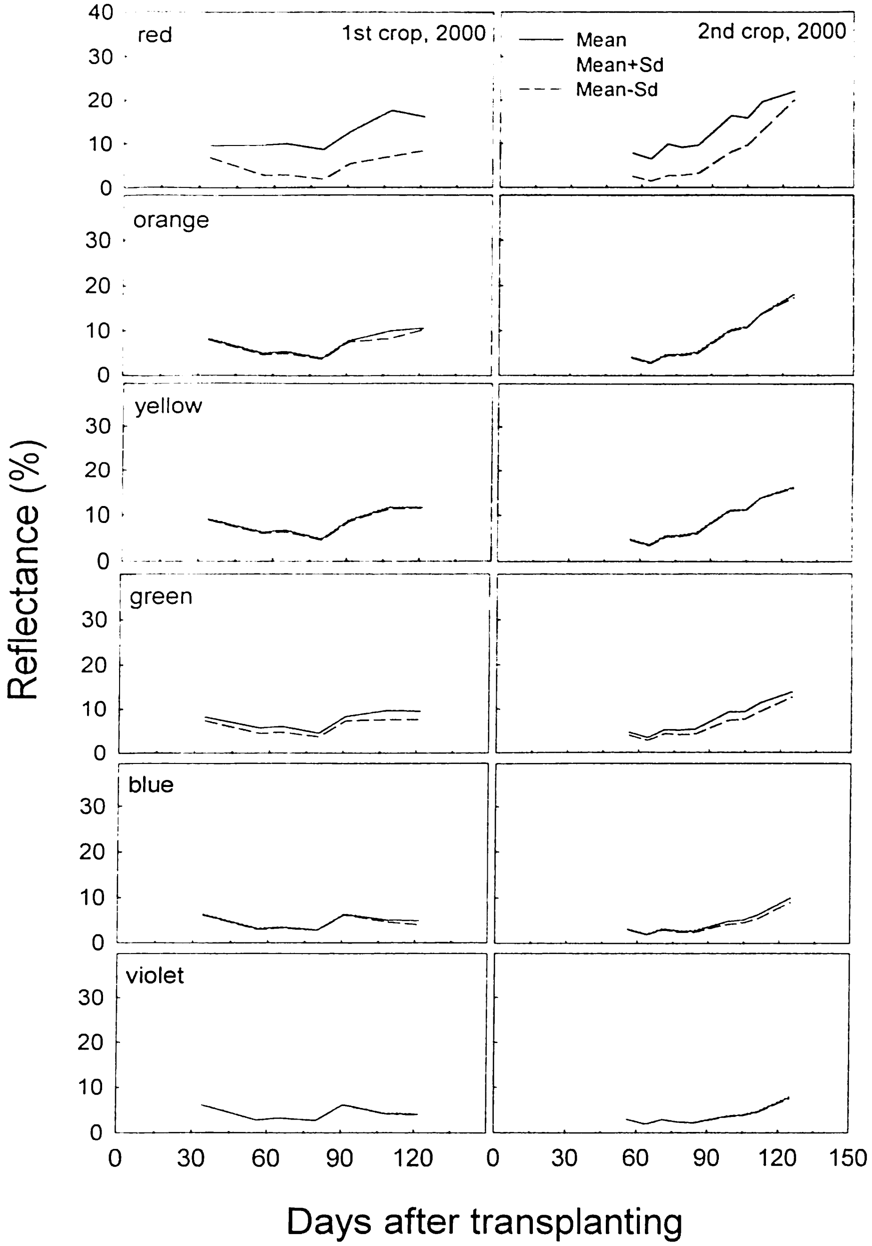


Fig. 3. Seasonal variations of reflectance in different wavebands of visible light from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000.

較易受到環境干擾，相對將較不適合利用於水稻生長與生育狀況之判識用途。

一般言之，健康綠色稻株葉片中的葉綠素及其它色素對光輻射具有強烈吸收作用，造成可見光波段的低反射比。Avers (1985) 指出，細胞色素對可見光波段的高吸收比例，以葉綠素 a 及葉綠素 b 對光輻射的吸收率最大，共佔總吸收量的 65%。又指出葉綠素 a 吸收部位約在 380-450 nm 及 675 nm 波段，葉綠素 b 的吸收部位約在 410-470 nm 及 610 nm 波段，β 胡蘿蔔素吸收波段爲 420-500 nm，葉黃素吸收波段位

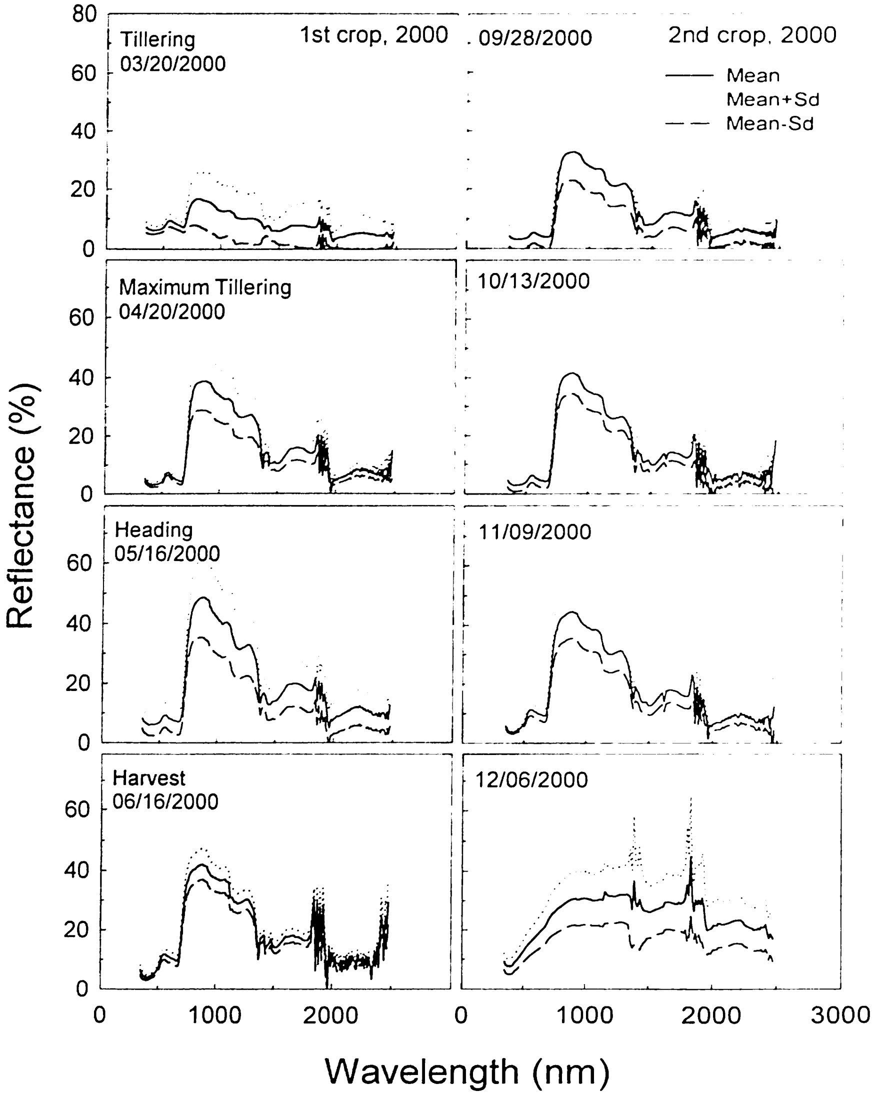


Fig. 4. Variations in canopy reflectance spectra of different growth stages from rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000.

於 400-500 nm。由於這些細胞色素的吸收光譜均集中在紅光及藍光波段，造成在 500-610 nm 範圍的綠黃色波段反射比較高(如圖 3)，此即植被顏色爲綠色的主要原因。而高能紫外光易對植株組織中的薄壁細胞造成破壞，因此葉片常發育生成表皮組織的腊質、木栓組織及其它酚類物質，以吸收與阻擋紫外光的可能傷害 (Larcher, 1983)。對水稻植株而言，短波高能的紫外光多穿透葉片或被植體吸收，導致植被反射比甚低。本研究之水稻對紫外光及可見光(尤以紫光之 400-413 nm 及紅光之 670 nm) 波段具有最大吸收率 (表 1A 及表 1B)，說明了稻株葉片色素以葉綠素a爲主，符合 Lee 和 Yang (1999) 及 Yang 和 Lee (2001) 之研究結果。

另由圖 2 及圖 3 之可見光波段的反射比在全生育期的表現，生育初期高反射比、生育中期低反射比、及至生育後期反射比逐漸上升，充分解釋植被覆蓋率及葉綠素

Table 1A. Analysis of canopy reflectance spectra for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first crop of 2000.

Growth stage	Rmean@	Sd	λmax	Rmax	λmin	Rmin
	-------- % --------		nm	%	nm	%
Tillering stage (03/20/2000)						
uv@@	7	0.3	351	7	399	6
vis	8	1.9	739	15	413	6
nir	15	1.8	806	17	1193	10
swir	7	1.0	1316	10	1494	6
mwir	5	2.0	1850	11	1965	3
Maximum tillering (04/20/2000)						
uv	4	0.6	351	5	399	3
vis	6	4.6	739	27	412	3
nir	36	3.2	876	39	1193	26
swir	15	3.8	1316	25	1377	10
mwir	9	4.6	1850	20	1965	2
Heading (05/16/2000)						
uv	7	0.6	351	8	399	6
vis	9	4.6	739	31	413	6
nir	44	4.6	877	49	1193	31
swir	19	4.4	1316	30	1450	13
mwir	12	4.3	1850	22	1965	5
Harvest (06/16/2000)						
uv	5	0.7	351	7	399	4
vis	10	6.1	739	32	408	4
nir	39	3.0	890	42	1193	29
swir	18	3.7	1316	28	1377	12
mwir	15	11.9	1850	30	1965	2
Whole season of growth			877	49	1965	2

@ Rmean and Sd: mean reflectance and standard deviation, respectively
Rmax and Rmin: reflectance at λmax and λmin, respectively
λmax and λmin: wavelengths of maximum and minimum reflectance, respectively
@@ uv: ultraviolet, 350-400 nm
vis: visible light, 400-740 nm
nir: near infrared, 740-1300 nm
swir: short-wave infrared, 1300-1800 nm
mwir: middle-wave infrared, 1800-2500 nm

含量在生育期間的變化。經過生育初期的稻株，隨著植體的生長與分櫱，葉面積及植被覆蓋率逐日累增，葉綠素含量及光輻射吸收率自然與日上升 (Blackburn, 1998; Yang and Lee, 2001)。當植株抽穗開花進入穀粒充實期後，生育邁向成熟老化階段，再隨著葉綠素的崩解、細胞色素的轉變及覆蓋率的降低，可見光波段反射比又逐漸升高。在植被對紅外光波段之反應方面，主要係受到葉內細胞壁纖維素、細胞間隙及充塡在細胞間隙內的水分等反射之影響，通常具有較高的反射比 (Gausman, 1982)。特別當生育日數增加，植株的成長帶來綠色植被覆蓋率及植體水分含量的增加，導致紅外光波段反射比大幅上升 (Penuelas et al, 1993)。直至生育後期，植株

Table 1B. Analysis of canopy reflectance spectra for rice plants (Oryza sativa L. cv. Tainung 67) grown in the second crop of 2000.

Growth stage	Rmean@	Sd	λmax	Rmax	λmin	Rmin
	-------- % --------		nm	%	nm	%
Tillering stage (03/20/2000)						
uv@@	3	0.4	351	4	399	3
vis	5	3.4	739	21	409	0
nir	29	3.0	872	32	1193	21
swir	12	3.2	1316	21	1450	8
mwir	7	4.5	1837	16	1965	2
Maximum tillering (04/20/2000)						
uv	4	0.5	351	5	399	3
vis	6	4.7	739	27	408	0
nir	37	4.0	877	42	1193	26
swir	14	3.7	1316	25	1508	10
mwir	8	5.9	1837	20	2442	3
Heading (05/16/2000)						
uv	4	0.7	351	6	399	4
vis	10	6.5	739	34	405	0
nir	41	3.3	883	45	1193	30
swir	17	4.2	1316	30	1508	13
mwir	10	5.0	1837	23	1965	4
Harvest (06/16/2000)						
uv	8	0.5	351	9	390	7
vis	16	5.5	739	25	402	0
nir	30	1.6	1161	33	740	26
swir	29	2.2	1391	37	1523	26
mwir	24	5.9	1837	45	2476	17
Whole season of growth			1837	45	409	0

@ Rmean and Sd: mean reflectance and standard deviation, respectively
Rmax and Rmin: reflectance at λmax and λmin, respectively
λmax and λmin: wavelengths of maximum and minimum reflectance, respectively
@@ uv: ultraviolet, 350-400 nm
vis: visible light, 400-740 nm
nir: near infrared, 740-1300 nm
swir: short-wave infrared, 1300-1800 nm
mwir: middle-wave infrared, 1800-2500 nm

逐漸枯老黃化，植體水分含量也日益減少，同時造成細胞間隙萎縮 (膨壓減少) 及綠色植被覆蓋率下降，而降低了紅外光波段的反射比 (Carter, 1991；Murtha, 1982)。

水稻植被反射光譜之光譜特徵動態變化

由於不同生育期之植被光譜變化與差異甚爲複雜，難以直接由偵測之全波段光譜比對，本研究乃續以綠光波段峰點 (GREEN)、紅光波段谷點 (RED) 及近紅外光波段峰點 (NIR) 等三項光譜曲線特徵及若干光譜特徵參數作深入分析，期以篩檢出表示水稻生育進展之合適光譜特徵 (或光譜特徵參數)。

圖 5 爲植被反射光譜中的綠光波峰

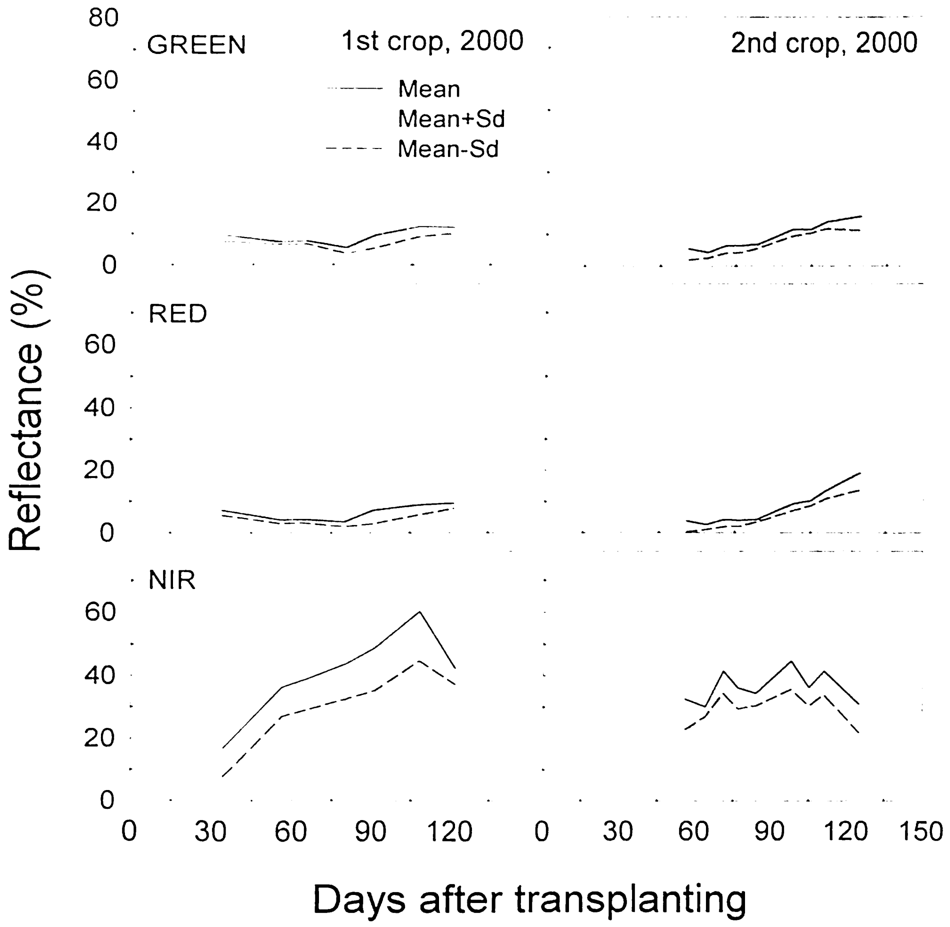


Fig. 5. Seasonal variations of reflectance at green light maximum (GREEN), red light minimum (RED), and near infrared peak (NIR) from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000.

(GREEN)、紅光波谷 (RED) 及近紅外光頂點 (NIR) 在稻株移植後之反射比時間序列變化，生育初期 GREEN 與 RED 反射比高，然隨生育進展緩慢下降，進入生育中期後再逐漸升高；NIR之趨勢則相反，反射比隨生育而提高，至接近成熟時降低。此結果及內涵意義符合前述。圖 6 及圖 7 為六項不同光譜特徵參數在全生育期間之變化，在由光譜曲線之特徵波長反射比構成之指數 (index) 方面，RED/NIR、RED/GREEN 及 GREEN/NIR 等三項呈現凹形曲線趨勢，NDVI 係呈現凸形曲線趨勢。紅光臨界斜率 (RES) 亦為凸形曲線，紅光臨界轉折點 (REIP) 則隨著生育日數增加而升高。這些光譜特徵參數在全生育期的變化，反映了 GREEN、RED 及 NIR 所在位置及其反射比的改變與相對關係，係稻株生長、分蘗與葉面積增加、葉綠素含量提高及植體水分含量上升等之綜合表現。大致上當 RED 及 GREEN 降低而 NIR 升高時，RED/GREEN、RED/NIR 及 GREEN/NIR 均隨之下降；當 RED 及 GREEN 上升而 NIR 漸減少時，RED/GREEN、RED/NIR 及 GREEN/NIR 則回升。

NDVI 的表現則反之，呈現凸形曲線，NDVI 是遙測技術中最常使用的一項綜合性

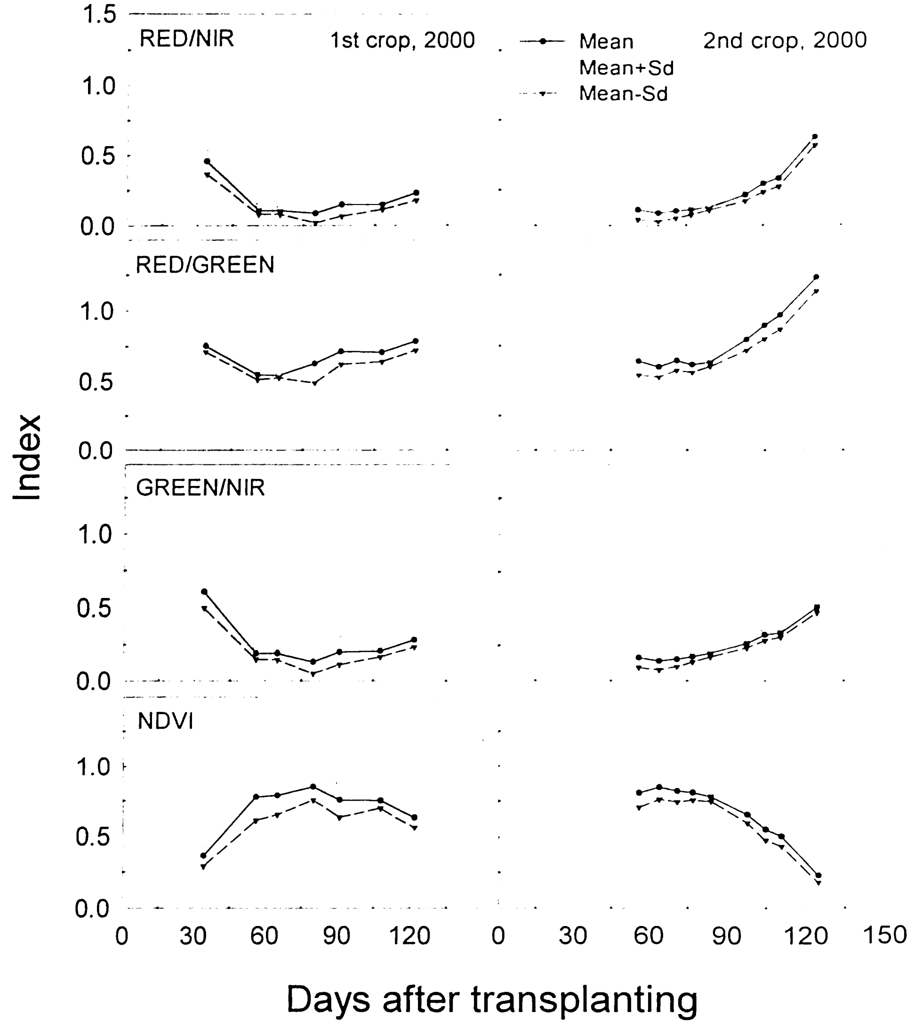


Fig. 6. Seasonal variations of different spectral indices calculated from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000. NDVI is the normalized difference vegetation index.

植被指標，與植被的生理狀態 (Pinty et al., 1993)、生質量 (Tucker, 1979) 及葉面積指數 (Baret and Guyot, 1991) 等性狀有高度相關。當 NDVI 愈大，表示植被生長愈繁茂，植被結構愈複雜且覆蓋率愈高。本研究中 NDVI 隨生育時間由高而低的曲線，說明了水稻植被的變化。紅光臨界斜率 (RES) 在生育全期的改變如 NDVI，反映出其隨生育進展升高，再因成熟老化而降低的結果。紅光臨界轉折點 (REIP) 則隨生育日數而往長波長方向移動，顯示出獨特而一致的現象。Horler (1980) 指出，紅光臨界位置及斜率會因爲作物的老化所導致葉綠素含量降低及丹寧酸增加而產生位移。Filella et al. (1994) 的研究也顯示，紅光臨界位置與葉綠素含量具有高度相關。因此，本研究中紅光臨界轉折點位置之位移，可能與稻株葉綠素及化學組成的改變有關，值得進一步探究。此外，兩期作的光譜曲線特徵及伴隨的光譜特徵參數之變化類似，但是幅度不一，顯示環境的差異對稻珠生長及生育的影響確實造成光譜上

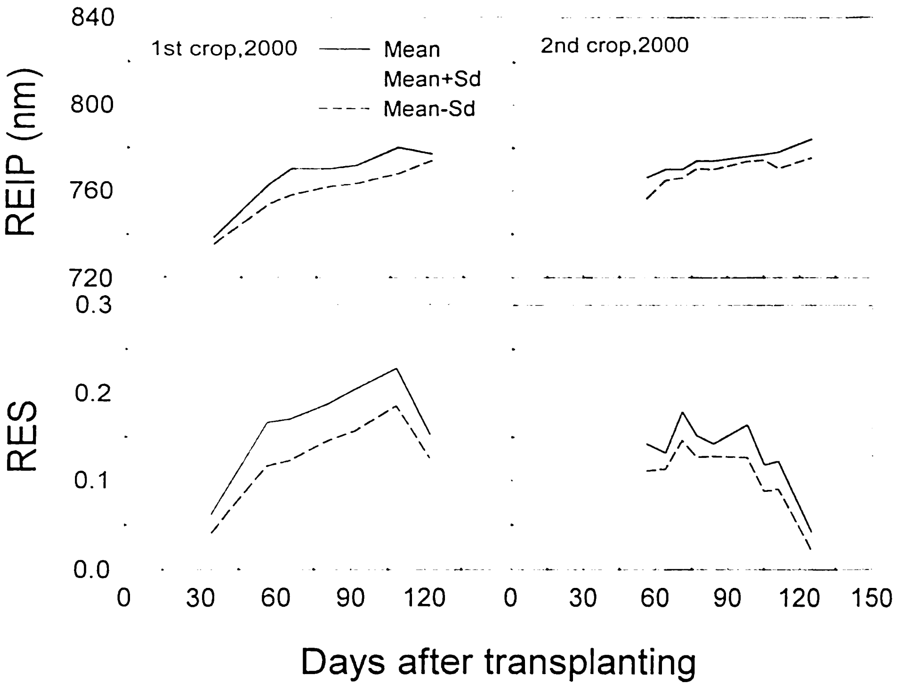


Fig. 7. Seasonal variations of red edge inflection point (REIP) and red edge slope (RES) calculated from canopy reflectance spectra of rice plants grown in the first and the second cropping seasons of 2000.

的分野。

在這些光譜特徵參數中，紅光臨界轉折點概隨著生育日數的增加而上升，即其波長位置隨著生育往長波長方向位移，因此似可利用於作爲水稻生育進展之區分標準。換言之，吾人可將水稻生育過程切劃成若干生育時期，各生育期有其對應之紅光臨界轉折點波長，由此波長位置的移動估測出生育期的進展。Thenkabail et al. (2000) 在玉米植被光譜研究上，發現生育期間近紅外光波段 (740-940 nm) 之反射比較高，建議以近紅外光段之最大反射比波長作爲識別玉米生長期的指標。Tucker (1979) 指出，植被覆蓋率愈高，其近紅外光之反射值愈大，且敏感度亦能相配合，故可作爲綠色植被生質量的指標。Murtha (1982) 研究顯示，當植物逐漸老化，葉綠素的崩解使得葉綠素含量降低，造成紅光及綠光之反射比上升。又因葉內構造的改變，使得近紅外光反射比降低。因此，建議將紅光、綠光及近紅外光之反射比的比値進行比較，即可獲知綠色植被覆蓋率的變化及植株老 (黃) 化的趨勢。

爲助益於農作物植被光譜層 (分) 析技術應用到田間栽培管理工作，勢必充分而完整的瞭解植被光譜之特徵與特性，乃至於建立光譜特徵 (或光譜特徵參數) 與生長性狀及生育之關係模式 (組)，才能將即時偵測之植被光譜與作物當時生長狀態 (況) 相連結做出因應決策處理。本項研究結果，提供了田間水稻在一、二期稻作全生育期間之植被光譜的動態分析，並發現紅光臨界轉折點具有作爲生育階段劃分標準的應用潛力。未來將持續利用上述光譜特徵參數，探討其與稻株生長性狀之關係，俾應用於估測與追蹤水稻族群之生長及產量的預測等多元用途。

引用文獻

楊純明 1997 輻射光譜及紅外線熱像技術在農作物生產上之應用。中華農業氣象4:1-10。

楊純明、蘇慕容 1997 水稻族群植冠反射光譜之分析。中華農業氣象4:87-95。

楊純明 1999 以遙測技術探討環境對水稻生產之影響。pp.161-179。環境與稻作生產，楊純明 主編。臺灣省農業試驗所/中華農業氣象學會出版，臺中縣霧峰鄉。

楊純明 2000 水稻精準農業(耕)體系之關鍵要素與科技。pp.15-24。水稻精準農業(耕)體系之研究，楊純明、林俊義主編。行政院農委會農業試驗所出版，臺中縣霧峰鄉。

Avers, C. G. 1985. Molecular Cell Biology. Addison-Wesley, Reading, MA.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment. 35:161-173.

Blackburn, G. A. 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. International Journal of Remote sensing. 19(4):657-675.

Brusch, W. C. 1989. Computerized irrigation scheduling using spectral feedback. p.561-568. In V. A. Dodd and P. M. Brusch (ed.) Proc. Int. Congr. On Agric. Eng., 11th. A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

Carter, G. A. 1991. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. American Journal of Botany. 78:916-924.

Chen, J. M. 1996. Evaluation of Vegetation indices and a modified simple ratio for boreal application. Canadian Journal of Remote Sensing. 22:229-242.

Christensen, S. 1991. Assessing leaf area index and light interception from spectral measurements. Proceedings from the workshop on remote sensing. Sostrup Castle, Grena, May 6-7.

Filella, I. and J. Penuelas. 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. International Journal of Remote Sensing. 15(7): 1459-1470.

Fleischer, S. J., R. Weisz, Z. Smilowitz and D. Midgarden. 1997. Spatial variation in insect populations and site-specific integrated pest management. pp.101-130. In F. J. Pierce and P. J. Sadler (ed.) The state of site specific management for agriculture. ASA, Madison, WI.

Fuchs, M. 1990. Canopy thermal infrared observations. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. (eds.) Goel, N. S. and J. M. Norman. pp.323-333. Harwood Acad. Publ. Gmb H, U. K.

Gausman, H. W. 1982. Visble light reflectance, transmittance, and absorptance of differently pigmented cotton leafs. Remote Sensing of Environment 13:233-238.

Horler, D. N. H. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. International Journal of Remote Sensing. 4:273-288.

Jacobsen, A., N. H. Broge and B. U. Hansen. 1995. Monitoring wheatfields and grasslands using spectral reflectance data. ISSSR, Melbourne, Victoria, Australia, 26 Nov-1 Dec, 1995.

Johnson, G. A., J. Cardina and D. A. Mortensen. 1997. Site-specific weed management: current and future directions. pp.131-148. In F. J. Pierce and P. J. Sadler (ed.) The state of site specific management for agriculture. ASA, Madison, WI.

Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecolgy. 50:663-666.

Larcher, W. 1983. Physiological plant ecology.

pp.5-60. Springer-Verlag, New York.

Lee, Y.-J. and C.-M. Yang. 1999. Relationship of plant growth and chlorophyll content in field-grown rice. Chinese Journal of Agromet. 6:191-2000.

Murtha, P. A. 1982. Detection and Analysis of Vegetation Stresses. pp.2-24. In R. J. Hall (ed.) Uses of Remote Sensing in Forest Pest Damage Appraisal: Proc. Northern Forest Research Centre Seminar in Edmoton. 1981, Vol. 1. Can. For. Serv., Northern For. Res. Cent., Edmonton, AB.

Penuelas, J., I. Filella, C. Biel, et al. 1993. The reflectance at the 950~970 nm region as an indicator of plant water status. International Journal of Remote Sensing. 14(10): 1887-1905.

Pinty, B., C. Leprieur and M. M. Verstraete. 1993. Towards quantitative interpretation of vegetation indices — Pat 1: Biophysical canopy properties and classical indices. Remote Sensing Reviews. 7:127-150.

Plant, R. E. and D. S. Munk. 1999. Application of remote sensing to irrigation management in California cotton. pp.1511-1522. In P. C. Robert, R. H. Rust and W. E. Larson (ed.) Proc. Int Conf. On Precision Agric., 4^{th}. ASA, Madison, WI.

Puritch, G. S. 1981. Nonvisual remote sensing of trees affected by stress: A review. Can. For. Ser., For. Tech. Rep. 30. Victoria, BC, Canada.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A., Schell and D. W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351. 1:309-317.

Shibayama, M., W. Takahashi, S. Morinaga and T. Akiyama. 1993. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer. Remote Sensing of Environment. 45(2):117-126.

Thenkabail P. S., R. B. Smith and E. De Pauw. 2000. Hyperspectral vegetation indices for determing agricultural crop characteristics. Remote Sensing of Environment. 71:158-182.

Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment. 8:127-150.

Wanjura, D. F. and J. L. Hatfield. 1987. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass. Trans-America Society Agriculture Engineers. 30(3):810-816.

Yang, C. H., G. L. Anderson and J. H. Everitt. 1998. A view from above: characterizing plant growth with aerial videography. GPS World, April 1998.

Yang, C.-M. and C.-H. Cheng. 2001. Spectral characteristics of rice plants infested by brown planthopper. Proc. Natl. Sci. Counc. ROC (B) 25:180-186.

Yang, C.-M. and Y.-J. Lee. 2001. Seasonal changes of chlorophyll content in field-grown rice crop and their relationships with growth. Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(B) 25:233-238.